

05;07

Особенности расчета и исследования вольт-эрстедной характеристики анизотропного магниторезистивного датчика

© В.В. Амеличев¹, Д.А. Жуков^{1,¶}, С.И. Касаткин², Д.В. Костюк¹, О.П. Поляков^{2,3},
П.А. Поляков³, В.С. Шевцов^{2,3}

¹ НПК „Технологический центр“, Москва, Зеленоград, Россия

² Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия

³ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

¶ E-mail: D.Zhukov@tscen.ru

Поступило в Редакцию 30 июня 2020 г.

В окончательной редакции 11 декабря 2020 г.

Принято к публикации 18 февраля 2021 г.

Представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований влияния величины собственного тока на характеристики анизотропных магниторезистивных датчиков магнитного поля на основе сплава FeNiCo со структурой типа „barber-pole“. Установлено существенное различие вольт-эрстедных характеристик прямого и обратного хода при увеличении собственного тока, вызванного входным напряжением питания, при достаточно больших внешних магнитных полях. Проведен теоретический расчет вольт-эрстедной характеристики в рамках модели одномерной неоднородности распределения намагниченности; полученная характеристика совпадает с экспериментальными данными для прямого хода.

Ключевые слова: теория микромагнетизма, магниторезистивный эффект, преобразователь магнитного поля, магниторезистивная наноструктура.

DOI: 10.21883/PJTF.2021.10.50967.18445

Датчики магнитного поля (ДМП) на основе магниторезистивных (МР) нанополосок с токовой неоднородностью низкорезистивных шунтов „barber-pole“ продолжают активно исследоваться с целью улучшения их характеристик [1–4]. В настоящей работе экспериментально и теоретически исследовано влияние магнитного поля собственного тока ДМП, вызванного напряжением питания (V_{in}), на его вольт-эрстедную характеристику (ВЭХ) и установлено влияние этого фактора на чувствительность, нелинейность и коэрцитивность.

Датчик магнитного поля на основе анизотропного магниторезистивного эффекта (АМР ДМП) состоит из системы магниторезистивных нанополосок, соединенных в мостовую схему. Эскиз фрагмента МР-полоски с низкорезистивными шунтами представлен на рис. 1. Низкорезистивные полоски-шунты располагаются на МР-элементе под углом 45° относительно оси легкого намагничивания (ОЛН), которая направлена вдоль длинной стороны МР-элемента. Направление тока в МР-элементе между низкорезистивными шунтами составляет угол 45° относительно его ОЛН при отсутствии внешнего поля. Внешнее магнитное поле, направленное перпендикулярно ОЛН МР-элемента, приводит к изменению его сопротивления.

Конструкция АМР ДМП включает тонкопленочные магниторезистивные элементы, соединенные в мостовую схему, и планарные катушки подмагничивания. В НПК „Технологический центр“ изготовлены и исследованы АМР-преобразователи со следующими параметрами магниторезисторов: ширина МР-плоски $10 \mu\text{m}$, расстояние между низкорезистивными шунтами $5 \mu\text{m}$,

их ширина $3 \mu\text{m}$. При объединении МР-полосок в мостовую схему [3–5] образуется четырехполосник, на входные полюса которого подается входное напряжение V_{in} . Если поместить АМР ДМП во внешнее магнитное поле \mathbf{H} , направленное перпендикулярно полоскам [5], то под действием поля произойдет отклонение вектора намагниченности \mathbf{M} в каждой малой области полоски на некоторый угол θ . Это приведет к изменению сопротивления данной области в соответствии с анизотропным магниторезистивным эффектом [1] и, следовательно, к изменению сопротивления МР-полосок АМР ДМП и изменению выходного напряжения V_{out} . Зная зависимость напряжения V_{out} от внешнего магнитного поля \mathbf{H} (вольт-эрстедная характеристика), можно по измеренному значению выходного напряжения V_{out} определить напряженность магнитного поля \mathbf{H} .

Для теоретического расчета ВЭХ необходимо знать пространственное распределение вектора намагниченности \mathbf{M} и плотности тока в полоске. Наибольшую сложность представляет решение микромагнитной задачи, которая в рассматриваемом варианте не может быть решена в общем случае, несмотря на большой прогресс, достигнутый в решении этой проблемы для магнитных образцов значительно меньшего размера [6]. В данной работе эта задача для рассматриваемых магнитных полосок решается в предположении, что в них не зарождаются магнитные домены и субдоменные структуры, а пространственное распределение намагниченности можно считать одномерным в рамках формализма, разработанного в работе [7]. Следует отметить, что при этих ограничениях микромагнитную задачу можно решить и

другими известными методами, например с помощью пакета программ OOMMF [8]. Однако время расчета при использовании этого пакета с той же точностью будет приблизительно в 10^5 раз больше.

Равновесное распределение вектора намагниченности \mathbf{M} находится как решение вариационной задачи на нахождение минимума полной магнитной энергии ферромагнетика относительно вариации $\delta\mathbf{M}$ [9]:

$$W = \int_V (w_a + w_m + w_H) dV = \min. \quad (1)$$

Здесь w_a — плотность энергии магнитной анизотропии,

$$w_a = K(M^2 - (\mathbf{M} \cdot \mathbf{n})^2)/M^2, \quad (2)$$

где K — константа одноосной анизотропии, \mathbf{n} — единичный вектор, направленный вдоль оси легкого намагничивания.

Величина w_m — плотность магнитостатической энергии, определяемая выражением

$$w_m = -\frac{1}{2}(\mathbf{M} \cdot \mathbf{H}_m), \quad (3)$$

где \mathbf{H}_m — магнитное поле, создаваемое объемными и поверхностными магнитными „зарядами“, называемое магнитостатическим или размагничивающим полем. Размагничивающее поле \mathbf{H}_m определяется уравнениями магнитостатики

$$[\nabla \times \mathbf{H}_m] = 0, \quad (4)$$

$$\nabla \cdot (\mathbf{H}_m + 4\pi\mathbf{M}(\mathbf{r}')) = 0. \quad (5)$$

Решение уравнений магнитостатики можно представить в виде

$$\mathbf{H}_m = \nabla \cdot \int_V \frac{\nabla \cdot \mathbf{M}(\mathbf{r}')}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} d\mathbf{r}' - \nabla \cdot \int_S \frac{\mathbf{M}(\mathbf{r}')}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} dS', \quad (6)$$

где V — объем, S — поверхность магнетика.

Последнее слагаемое в (1) представляет собой плотность зеемановской энергии:

$$w_H = -(\mathbf{M} \cdot \mathbf{H}). \quad (7)$$

Следуя [7], сведем континуальную модель к дискретной, разделяя магнитную полосу на систему N ячеек (длинных одномерных полосок), в пределах которых распределение намагниченности считается однородным. Тогда система (1)–(7) сведется к системе N уравнений, для решения которой можно использовать эффективные математические методы [7]. В исследуемых МР-полосках распределение тока между низкорезистивными шунтами (рис. 1) будет неоднородным. В первом приближении эту неоднородность можно учесть как отсутствие токов в треугольных областях на краях вдоль полоски (на рис. 1 эта область обозначена штриховой линией). Результаты расчета и экспериментального измерения ВЭХ для ДМП на основе МР-полосок с токовой неоднородностью низкорезистивных шунтов с параметрами,

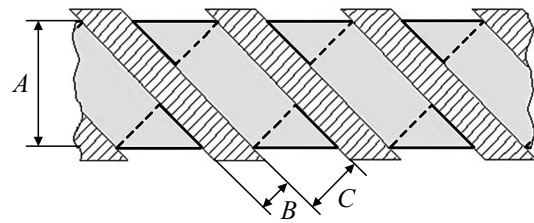


Рис. 1. Фрагмент МР-полоски. A — ширина МР-полоски, B — ширина низкорезистивного шунта, C — расстояние между низкорезистивными шунтами в МР-полоске.

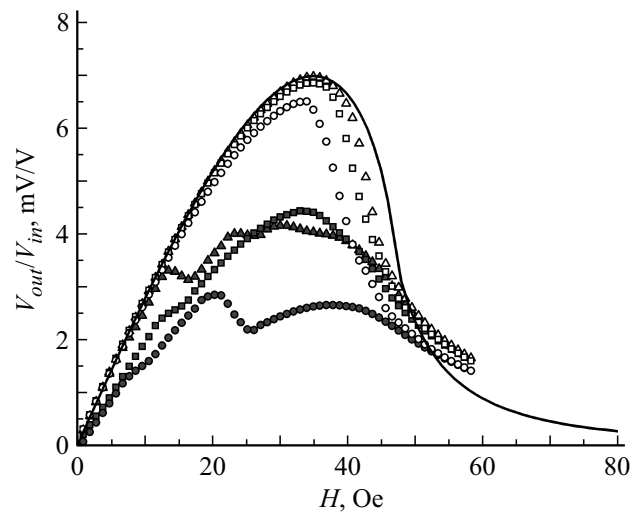


Рис. 2. Экспериментальные зависимости ВЭХ от величины входного напряжения ДМП при изменении внешнего поля в пределах 58 Ое. Треугольниками отмечены значения при $V_{in} = 1$ В, квадратами — при 5 В, кружками — при 9.5 В. Светлые символы соответствуют увеличению магнитного поля, серые — уменьшению. Сплошная кривая — теоретический расчет.

указанными выше, представлены на рис. 2. Сплошной линией показана теоретическая кривая, рассчитанная в рамках предложенной модели одномерной неоднородности распределения намагниченности в полоске [7]. Результаты экспериментального измерения зависимости ВЭХ от величины собственного тока АМР ДМП, вызванного различными напряжениями ($V_{in} = 1, 5$ и 9.5 В), при увеличении напряженности магнитного поля от 0 до 58 Ое и при обратном уменьшении магнитного поля до нуля представлены символами на рис. 2.

Из рис. 2 следует, что предложенная теоретическая модель достаточно точно описывает прямой ход ВЭХ, но при обратном ходе (уменьшении магнитного поля) экспериментальная кривая идет заметно ниже. Это свидетельствует о значительном гистерезисе МР-полосок в данном диапазоне изменения магнитного поля. Предполагается, что при уменьшении магнитного поля в МР-полосках возникают продольные магнитные домены, которые уменьшают разность МР-сопротивления в противоположных плечах мостовой схемы, что приводит

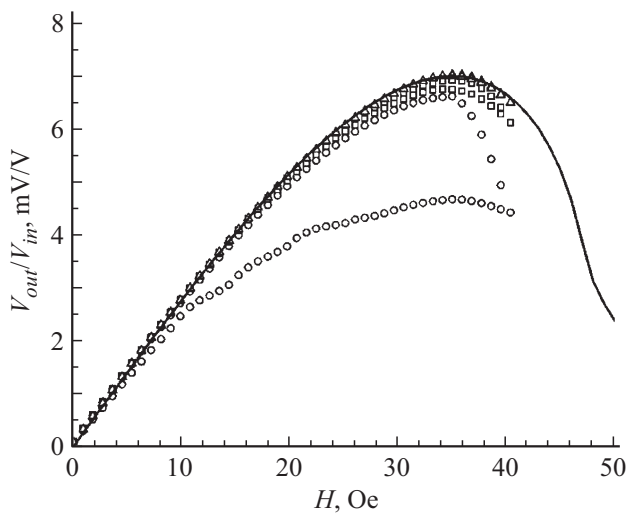


Рис. 3. Экспериментальная зависимость ВЭХ от величины входного напряжения ДМП при изменении внешнего поля в пределах 40 Ое. Треугольниками отмечены значения при $V_{in} = 1$ В, квадратами — при 5 В, кружками — при 9.5 В.

к снижению выходного напряжения. При увеличении магнитного поля выше 40 Ое наблюдается отклонение теоретической зависимости от экспериментальной. Это, возможно, обусловлено неточным учетом распределения токов вдоль краев МР-полоски, так как при больших полях распределение намагниченности в краевых областях вносит определяющий вклад в изменение МР-сопротивления.

На рис. 3 представлена ВЭХ при меньшем диапазоне изменения внешнего магнитного поля от 0 до 40 Ое и обратно при тех же значениях V_{in} . Из данной характеристики следует, что при малом входном напряжении $V_{in} = 1$ В теоретические и экспериментальные данные совпадают с высокой точностью и обладают низким гистерезисом. При увеличении напряжения V_{in} до 5 и 9.5 В проявляется гистерезис и наблюдается уменьшение экспериментальной характеристики по сравнению с теоретической при больших значениях внешнего магнитного поля. При магнитном поле до 10 Ое теоретические и экспериментальные данные характеризуются хорошим совпадением.

Таким образом, проведенные в работе исследования показали наличие гистерезиса ВЭХ АМР-датчика со структурой типа „barber-pole“, величина которого существенно зависит от величины собственного тока, вызванного входным напряжением, и напряженности внешнего магнитного поля. Теоретические расчеты ВЭХ, основанные на модели одномерной неоднородности распределения намагниченности [7], совпадают с экспериментальными кривыми при увеличении внешнего магнитного поля, но не объясняют особенности кривой обратного хода (гистерезис) при больших собственных токах и магнитных полях при уменьшении внешнего магнитного поля.

Благодарности

Исследование проводилось с использованием оборудования ЦКП „Функциональный контроль и диагностика микро- и наносистемной техники“ на базе НПК „Технологический центр“.

Финансирование работы

Работа поддержана Фондом развития теоретической физики и математики „БАЗИС“.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] C. Wang, W. Su, Z. Hu, J. Pu, M. Guan, B. Peng, L. Li, W. Ren, Z. Zhou, Z. Jiang, M. Liu, *IEEE Trans. Magn.*, **54** (11), 2301103 (2018). DOI: 10.1109/TMAG.2018.2846758
- [2] P.V. Sreevidya, J. Khan, H.C. Barshilia, C.M. Ananda, P. Chowdhury, *J. Magn. Magn. Mater.*, **448**, 298 (2018). DOI: 10.1016/j.jmmm.2017.08.064
- [3] W. Su, Z. Wang, T. Wen, Z. Hu, J. Wu, Z. Zhou, M. Liu, *IEEE Electron Dev. Lett.*, **40** (6), 969 (2019). DOI: 10.1109/LED.2019.2913506
- [4] Д.А. Жуков, М.А. Куприянова, Ю.И. Мокринский, В.В. Амеличев, Д.В. Костюк, Д.В. Васильев, Е.П. Орлов, *Нано- и микросистемная техника*, **20** (10), 579 (2018). DOI: 10.17587/nmst.20.579-584
- [5] C.-J. Zhao, M. Li, J.-W. Li, L. Ding, J. Teng, G.-H. Yu, *J. Magn. Magn. Mater.*, **368**, 328 (2014).
- [6] М.Н. Дубовик, В.В. Зверев, Б.Н. Филиппов, *ЖЭТФ*, **150** (1), 122 (2016). DOI: 10.7868/S0044451016070117
- [7] В.С. Шевцов, О.П. Поляков, В.В. Амеличев, С.И. Касаткин, П.А. Поляков, *Вестн. МГУ. Сер. 3: Физика, астрономия*, № 5, 40 (2019).
- [8] J.P. Adam, S. Rohart, J.P. Jamet, J. Ferré, A. Mougin, R. Weil, H. Bernas, G. Faini, *Phys. Rev. B*, **85** (21), 214417 (2012). DOI: 10.1103/PhysRevB.85.214417
- [9] V. Heinrich, J.F. Cochran, *Adv. Phys.*, **42** (5), 523 (1993).